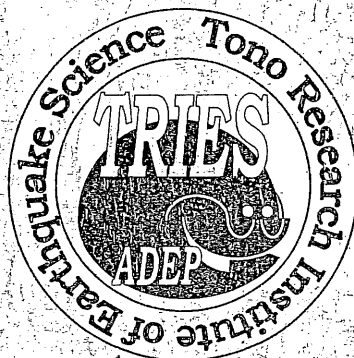


東濃地震科学研究所報告

Seq. No.38

地殻活動研究委員会報告書
(平成28年度)



2017年3月

公益財団法人 地震予知総合研究振興会

熊本地震・鳥取県中部地震時の地下水の挙動

向井 厚志 (福山市立大学都市経営学部)

大塚 成昭 (神戸学院大学人文学部)

福田 洋一 (京都大学大学院理学研究科)

1. はじめに

地震に伴う地下水流の変化は、1995年兵庫県南部地震(M7.3)や2008年四川地震(Mw7.9)などで観測されてきた(Sato et al., 2000; Wang et al., 2009)。著者らが長年観測に関わっている兵庫県南部の六甲高雄観測室は万福寺断層を貫き、約600ml/sの湧水が定常的に生じているが、1995年兵庫県南部地震発生直後には湧水量が5500ml/s以上増加した(藤森他, 1995)。また、2001年芸予地震(M6.7)、2004年紀伊半島南東沖の地震(M7.4)、2007年新潟県中越沖地震(M6.8)と、遠方で発生したM7前後の地震時においても約100ml/sの湧水量の増加が観測されてきた。

地震に伴う湧水量変化は、断層変位による体積歪変化等の地殻変動に加えて、地震動による透水性の変化によっても引き起こされる(小泉, 2013)。向井他(2016)は、被圧地下水層である断層破碎帯内で水平方向にのみ移動する地下水流をモデル化し、間隙水圧変化および湧水量変化から透水性構造の変化を推定するための理論式を導出した。2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)の際に六甲高雄観測室で観測された間隙水圧変化および湧水量変化にこのモデルを当てはめた結果、地震直後の約1ヶ月間にわたって透水係数が地震前の約1.3倍に増大したことが示された(向井他, 2016)。この透水性の上昇は、亀裂を目詰まりさせていた泥分等が地震動によって緩んだり、流出したりしたためと推察された。

上記の地下水流モデルは均質一様な透水性構造を仮定しているが、一般に透水性は断層面からの距離に依存する。こうした不均質な透水性構造を考慮したモデルに改良するため、著者らは六甲高雄観測室内に水位計を増設した。本稿では、2016年に発生した三重県南東沖の地震(M6.5)、熊本地震(最大M7.3)および鳥取県中部地震(M6.6)に伴う間隙水圧変化等の特徴を記すとともに、推定された透水性構造の非一様な変化について報告する。

2. 六甲高雄観測室における水位計の増設

六甲高雄観測室は万福寺断層を貫く新神戸トンネルの緊急避難路に開設され、断層破碎帯から定常的に湧水が生じている。その湧水は側溝に集められ、東北東側へ排出されている。同観測室における湧水量観測は、側溝に設けたV字堰における水位変化の測定を通して実施されてきた。また、2009年から2015年まで水位計1台(WP2)を用いて、間隙水圧変化の観測も行われてきた(図1)。この水位計は、床面にある直径13cmの穴にパイプを挿入し、内径4cmの円筒内の水位変化を圧力センサーで測定することで間隙水圧変化を観測している。

地下水流を空間的に稠密に観測し、不均質な透水性構造を考慮した地下水流モデルを構築するため、著者らは2016年に水位計を2台増設した。水位計WP3は2016年3月18日に、水位計WP2.5は2016年8月27日に観測を開始した。いずれの水位計も、現在、既存の水位計WP2と同様な観測システムを採用している。万福寺断層からの距離は、WP2, WP2.5, WP3の順に遠く、約20m間隔で設置されている。2016年9月1日における水位計WP2, WP2.5およびWP3の水位は、それぞれ床面から約440mm、約340mmおよび約160mmであり、断層に近いほど低い。これは、断層近傍では亀裂が発達しており、主

要な湧水地点に近い為、水圧がかかりにくい状況を反映していると考えられる。

水位計 WP3 は当初、密封容器内の水圧を測定する方式で設置が進められた。この密封方式では、容器内外への地下水の移動がないため、短周期の間隙水圧変化も正確に測定することができる。しかし、計器設置から約2週間経過した後に、ステップ状の水圧変化が観測されるようになった(図2(a))。これは、密封容器内に気泡がたまり、圧力センサーが水面から露出したことに起因する。容器内にたまった空気の圧力は容器内の水位と周辺岩盤の地下水位との差に相当するため、圧力センサーが水面から露出すると、見かけ上、大きな圧力(高い水位)が観測される。六甲高雄観測室周辺の地下水には気泡が多く含まれており、図2(a)のような密封方式では間隙水圧変化を長期間観測できないことが判明した。

その後、既存の水位計WP2と同様に、上端を開放した円筒内の水位変化を測定する方式に変更した結果、図2(b)で示すように、安定した間隙水圧変化を観測することができるようになった。なお、図中に見られるステップ状の変化は、三重県南東沖の地震および熊本地震によるものである。

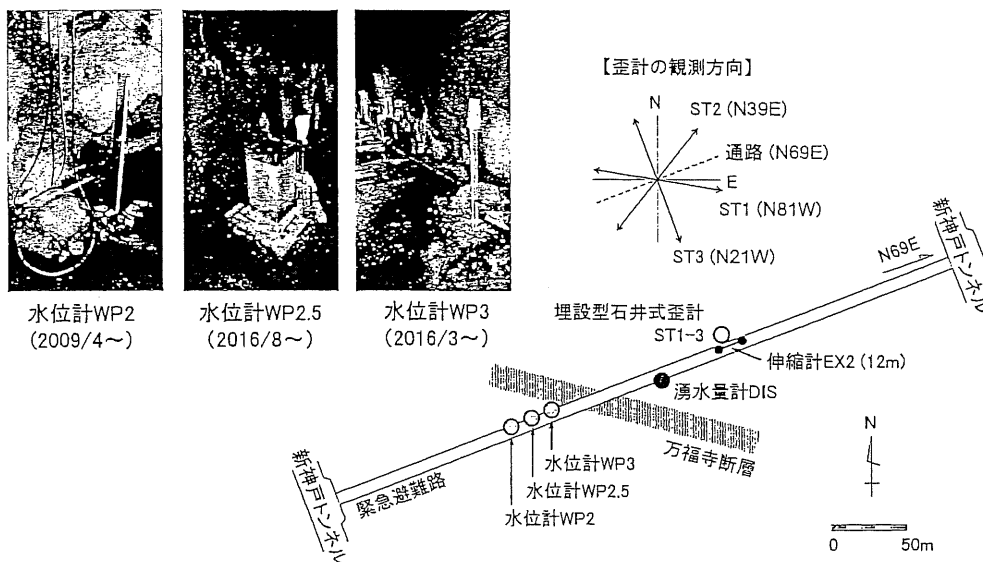


図1. 六甲高雄観測室における主な観測機器の配置

水位計 WP2, WP2.5, WP3, 湧水量計 DIS, 埋設型石井式歪計 ST1, ST2, ST3 および伸縮計 EX2 の配置を示す。図左上に写真は各水位計の外観であり、写真下には各水位計の観測開始時期を記す。

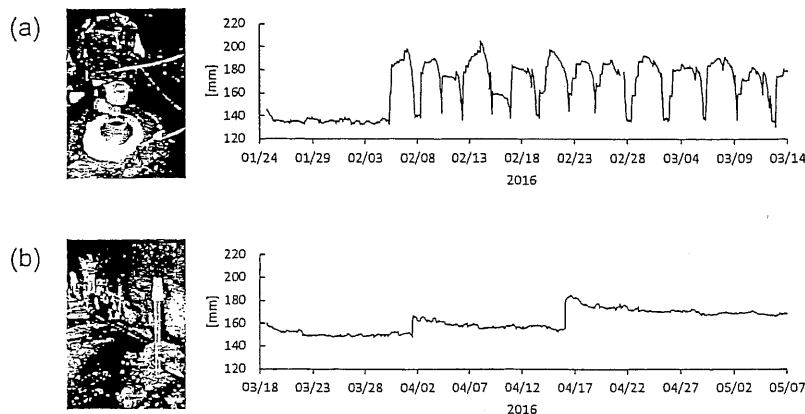


図2. 水位計 WP3 の測定方法に応じた観測値の違い

(a) 密封容器内の水圧変化を測定する方式, (b) 上端を開放した円筒内の水位変化を測定する方式

3. 2016年の地震に伴う湧水量変化および間隙水圧変化

図3は、2016年に観測された湧水量変化および間隙水圧変化を、伸縮計 EX2 および埋設型石井式歪計 ST1, ST2, ST3 によって得られた歪変化、ならびに神戸地方気象台で得られた地上気圧観測値とともに示す。湧水量および間隙水圧観測値には、2016年4月1日発生三重県南東沖の地震(M6.5)、同年4月16日発生熊本地震(M7.3)および同年10月21日発生鳥取県中部地震(M6.6)に伴う顕著なステップ状の変化が見られる。

国土地理院発表の震源断層モデルに基づいて六甲高雄観測室における地震時の面積歪変化を計算したところ、熊本地震および鳥取県中部地震ではそれぞれ $+0.8$ および $+7.2 \times 10^{-9}$ strainの伸長と求められた。また、三重県南東沖の地震は六甲高雄観測室の南東方向に震源があり、北西-南東に圧縮軸をもつ逆断層型の地震であったため、同観測室では伸長の面積歪変化が生じたことになる。このように、六甲高雄観測室ではいずれの地震時においても伸長の面積歪変化が予測される。しかし、埋設型石井式歪計の歪観測値から求めた地震に伴う面積歪変化は $-5 \sim -450 \times 10^{-9}$ strainの収縮を示しており、湧水量および間隙水圧は地震発生直後にステップ状に増大した。

三重県南東沖の地震では、伸縮計および埋設型石井式歪計による歪観測値に、トレンドの変化が見られた。また、鳥取県中部地震では、埋設型石井式歪計 ST2 および ST3 による歪変化に、湧水量や間隙水圧と同様な地震後の指数関数的な変化が含まれている。これらの歪変化の一部は、地下水流動の変化に起因している可能性が考えられる。

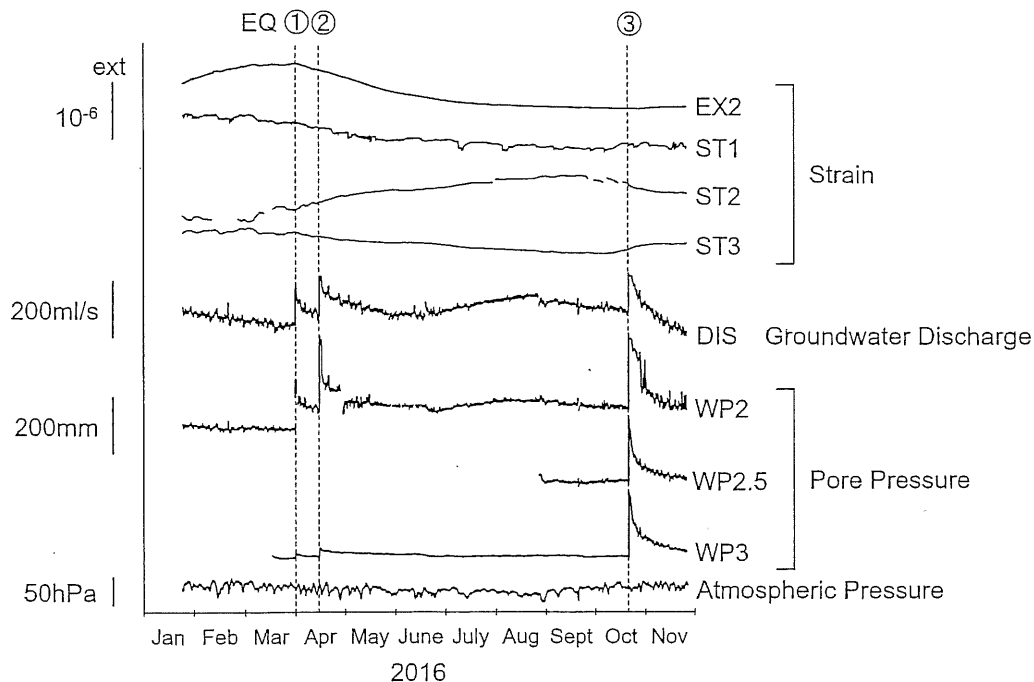


図3. 2016年に観測された歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化

2016年1月24日～11月26日の約10ヶ月間に六甲高雄観測室で観測された歪変化(EX2, ST1, ST2, ST3)、湧水量変化(DIS)および間隙水圧変化(WP2, WP2.5, WP3)を、神戸地方気象台で観測された地上気圧とともに示す。図中の縦の点線は、それぞれ三重県南東沖の地震(EQ①)、熊本地震(EQ②)、鳥取県中部地震(EQ③)の発生日を示す。

図4は、地震前後20分間に観測された湧水量変化および間隙水圧変化を歪観測値とともに示す。地震動の伝播とともに、 0.1×10^{-6} strain以上の歪地震動が始まり、間隙水圧が指数関数的に増大した。一方、湧水量は、地下水の移動に時間を要するため、地震動伝播の数分後にゆるやかに増加していった。それら変化の時定数は地震によって大きく異なる。鳥取県中部地震では、他の2つの地震と比べて、湧水量変化および間隙水圧変化の時定数が顕著に短く、地震動の伝播直後に大量の地下水流が出口である観測室に押し寄せたことが伺える。

六甲高雄観測室の東14kmに位置する西宮で観測された計測震度は、防災科学技術研究所K-netの公開データによると、三重県南東沖の地震、熊本地震および鳥取県中部地震においてそれぞれ1.6、2.2および2.9であり、最大加速度は3.2、5.2および21.4galであった。鳥取県中部地震では、他の2つの地震と比べて神戸周辺で地震動が激しく、地下水流や地盤の透水性構造に大きな影響を与えたものと考えられる。なお、間隙水圧変化に地震動のような短周期の振動が見られるが、これは気泡の放出に伴う乱れの可能性がある。

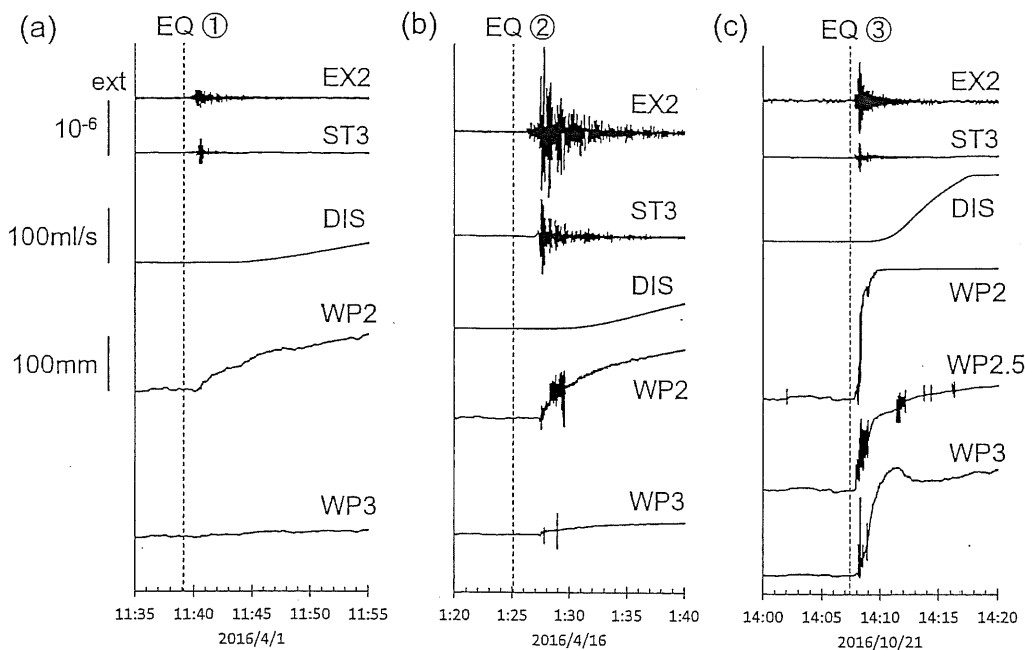


図4. 地震発生直後の歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化

(a)三重県南東沖の地震(EQ①)、(b)熊本地震(EQ②)、(c)鳥取県中部地震(EQ③)の発生前後20分間に観測された歪変化(EX2, ST3)、湧水量変化(DIS)および間隙水圧変化(WP2, WP2.5, WP3)を示す。縦の点線は、いずれも地震の発生時刻を示す。

図5は、地震前後14日間における湧水量変化および間隙水圧変化を示す。地震発生直後にステップ状に増大した湧水量および間隙水圧は、その後、指数関数的に低下していった。その時定数は地震によって異なり、三重県南東沖の地震、熊本地震および鳥取県中部地震で、それぞれ1.6日、1.3日および3.0日であった。図5の太線は、地震発生後の観測値に当てはめた指数関数 $ae^{-t/T} + b$ のグラフである。ここで、 t は地震動到達時刻からの経過時間、 T は上記の時定数であり、最小二乗法により係数 a と b の値を決定した。

湧水量は、V字堰を設けた側溝における水位変化を測定することから、側溝から水があふれるほど大

量の湧水が生じた場合、正しく計測することができない。そのため、図5(b)および(c)には、地震直後に湧水量増大の頭打ちが見られる。

間隙水圧変化 WP2 には、地震発生から数日後にステップ状の増大または低下が見られる。こうしたステップ状の間隙水圧変化は、地震とは無関係な期間においても発生しており、計測システムに起因する見かけの変化にすぎないと考えられる。

鳥取県中部地震時の間隙水圧変化 WP2 は、こうしたステップ状の増大が地震直後に発生し、約1週間後に正しいレベルに復帰した。その後もステップ状の変化が頻発したため、適切な指数関数の当てはめができなかった。図5(c)には、係数 a の値が 100mm と 200mm の場合の指数関数のグラフが太い破線および点線で描かれているが、当てはめの優劣をつけることができず、地震に伴うステップ状の変化量を推定することは困難である。

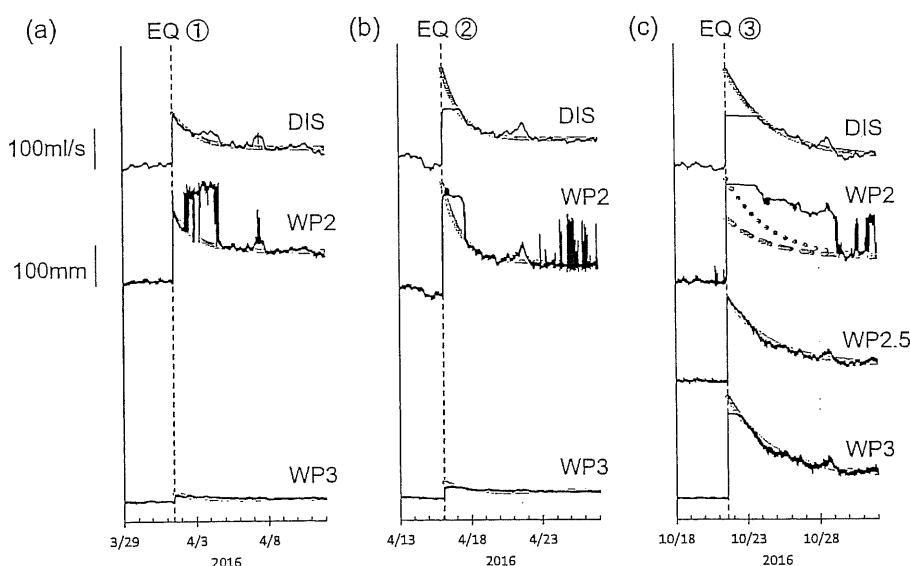


図5. 地震に伴う湧水量変化および間隙水圧変化

(a)三重県南東沖の地震(EQ①), (b)熊本地震(EQ②), (c)鳥取県中部地震(EQ③)の発生前後14日間に観測された湧水量変化(DIS)および間隙水圧変化(WP2, WP2.5, WP3)を細線で示す。灰色の太線は、地震発生後の観測値に当てはめた指数関数である。縦の点線は、いずれも地震の発生日時を示す。なお、(c)のWP2は、地震発生後1週間にわたって有効な観測データが得られなかったため、適切な指数関数の当てはめができなかった。

図6は、地震発生直後に生じた間隙水圧および湧水量のステップ状の変化量を、横軸を西宮における各地震の計測震度として示す。これらのステップ量は、図5で当てはめた指数関数の $t=0$ における値と地震発生前1日間の平均値との差として求めた。

三重県南東沖の地震および熊本地震では、計測震度に比例する形で湧水量のステップ状の変化量が增大している。一方、鳥取県中部地震では、計測震度が熊本地震の2.2よりも30%大きな2.9であるにもかかわらず、湧水量のステップ状の変化量は熊本地震時の値と同程度となっている。地震に伴う湧水量の増加は、周辺の地下水が水源に流れ込んだり、破碎帯の透水性が上昇したりすることによって生ずると考えられるが、地下水量には限界があるため、湧水量の増加が頭打ちになったと推察される。

地震に伴う間隙水圧変化に関しても、三重県南東沖の地震および熊本地震では、計測震度に比例する形で増大している。また、WP2と比べて、断層に近い地点であるWP3の方が、間隙水圧の増大幅が小

さい。これは、断層に近いほど、亀裂が発達している上、主要な湧水地点に近く、間隙水圧がかかりにくい状況になっているためと考えられる。

一方、鳥取県中部地震では、断層に近い WP3 の方が、WP2.5 よりも大きな間隙水圧変化を示した。また、WP3 では、熊本地震時と比べて、6倍以上ものきわめて大きな間隙水圧変化が生じた。激しい地震動によって WP3 の測定地点近傍で大規模な目詰まりが生じたなど、局所的に透水性構造が大きく変化した可能性が考えられる。

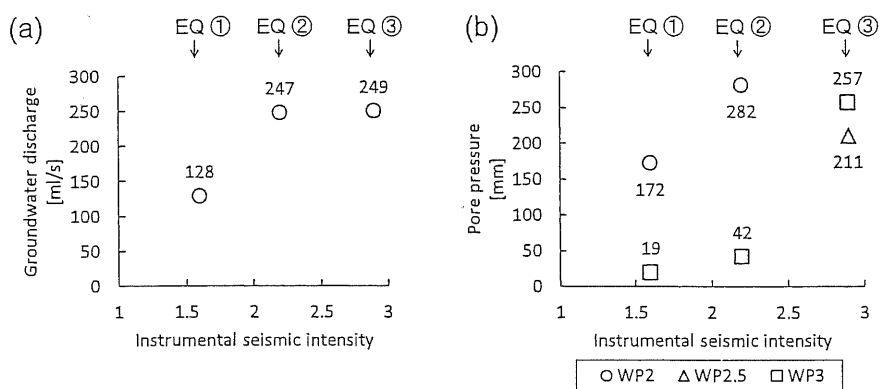


図6. 地震発生直後に生じた湧水量および間隙水圧のステップ状の変化量

三重県南東沖の地震(EQ①)、熊本地震(EQ②)、鳥取県中部地震(EQ③)の発生直後に生じた(a)湧水量および(b)間隙水圧(WP2, WP2.5, WP3)のステップ状の変化量を示す。横軸は、六甲高雄観測室の東約14kmに位置する西宮で測定された計測震度である。

4. 2016年の地震に伴う透水性構造の変化

向井他(2016)の一次元地下水流モデルを間隙水圧および湧水量観測値に適用して、地震に伴う透水係数の変化および水源水圧の変化を推定した。図7は、湧水量観測値に組み合わせる間隙水圧観測値(WP2, WP2.5, WP3)に応じた推定結果を示す。

図7(a)(b)(c)に見られるように、推定された水源水圧は地震発生直後にステップ状の増大を示し、その後、指数関数的に低下した。また、図7(d)(e)(f)は、推定された透水係数においても地震に伴うステップ状の変化が生じたこと、また、その後、指数関数的に元のレベルに戻っていったことを示している。これらは、地震動によって亀裂内の泥分が緩んだり流出したりするなど、周辺岩盤の透水性構造が変化し、また、その結果として周辺の地下水が水源に流れ込んだことに起因すると推察される。

地震に伴う水源水圧や透水係数の変化の大きさは、間隙水圧観測値の測定地点によって異なる。また、三重県南東沖の地震および熊本地震では、断層に近い間隙水圧値 WP3 を用いた場合、地震発生直後に透水係数の増大が推定されたが、断層から離れた地点の間隙水圧値 WP2 を用いた場合には、透水係数の低下が求められた。均質な透水性構造を仮定した向井他(2016)の一次元地下水流モデルでは、どの地点の間隙水圧観測値を使用しても、透水係数および水源水圧の変化に関して必ず同じ推定結果になることが期待される。しかし、実際の推定結果は間隙水圧の観測地点に依存しており、均質な透水性構造を仮定することは現実的ではないことを示している。一般的に断層破碎帯から遠ざかるほど、亀裂が未発達で透水性が低くなる傾向がある。図7の推定結果は、間隙水圧の観測地点近傍の透水性構造を強く反映したものであり、複数地点の間隙水圧観測値を用いることによって、こうした不均質な透水性構

造に関する情報を得ることが可能であることを示唆している。

三重県南東沖の地震および熊本地震では、断層に近い地点 WP3 で透水性が上昇し、遠い地点 WP2 で透水性が低下したことが伺える。地震動によって亀裂に留まっていた泥分等が流出した場合、亀裂が十分に発達した断層破碎帯では、大量の地下水流が集中し、その勢いで泥分等がそのまま流出してしまったのに対して、亀裂が未発達な周辺岩盤では、泥分等の目詰まりが起りやすく、透水性の低下が生じたものと推察される。

ただし、鳥取県中部地震では、断層に近い地点 WP3 においても、透水性の大幅な低下が推定された(図7(f))。同地震発生時には神戸付近で計測震度 2.9 の激しい揺れが生じており、断層破碎帯で亀裂を押しつぶすような岩盤圧縮が起きた可能性が考えられる。その場合、長期的に透水性の低下が残ることが予想されるため、今後の観測結果に基づいて検証していく必要がある。

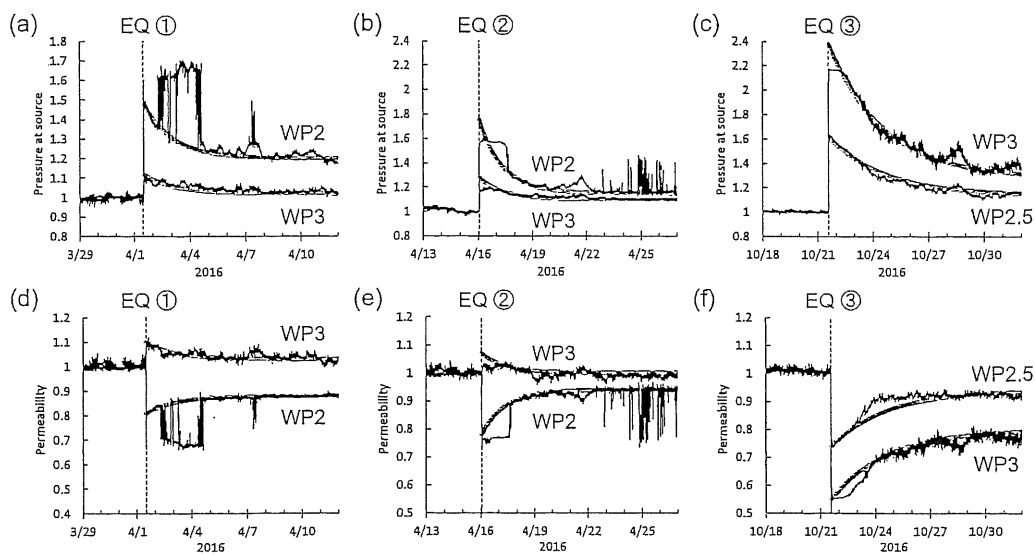


図7. 地震発生前後の水源水圧および透水係数の変化

三重県南東沖の地震(EQ①)、熊本地震(EQ②)、鳥取県中部地震(EQ③)の発生前後における水源水圧の変化(上段(a)(b)(c))および透水係数の変化(下段(d)(e)(f))を細線で示す。いずれも地震発生直前の値に対する相対的な変化として描かれている。図中のWP2、WP2.5およびWP3は、水理学的特性の変化を推定する際に用いた間隙水圧観測値を示す。なお、図中の太線は、各時間変化に当てはめた指数関数を表す。

5. まとめ

六甲高雄観測室では 2016 年に水位計を2台増設し、既存の水位計1台とともに万福寺断層からの距離が異なる3ヶ所で間隙水圧変化の連続観測を実施している。これらの水位計を用いて、2016年に発生した三重県南東沖の地震、熊本地震および鳥取県中部地震に伴う間隙水圧変化が観測された。間隙水圧は地震動伝播直後にステップ状の増大を示し、その後、数日の時定数で指数関数的に低下した。

間隙水圧観測値および湧水量観測値に一次元地下水流モデルを適用して、上記の地震に伴う透水性構造の変化を推定した。その推定結果は間隙水圧変化の観測地点に依存しており、透水性構造の変化は一様に生じているわけではないことを示している。したがって、複数地点の間隙水圧観測値を用いることによって、断層破碎帯周辺の不均質な透水性構造に関する情報を得ることが可能であると考えられる。

謝 辞

六甲高雄観測室の整備と観測継続に関しては、神戸市道路公社および阪神高速道路株式会社のご理解とご援助の賜である。また、本研究を進めるにあたり、その一部として神戸学院大学人文学部研究推進費が使用された。ここに謝意を表する。

参考文献

- 藤森邦夫・山本剛靖・大塚成昭・石井紘(1995): 六甲高雄観測室における地殻変動と地下水の観測—1995年兵庫県南部地震に関連した変化—, 京都大学防災研究所年報, 38, 287-296.
- 小泉尚嗣(2013): 地震時および地震後の地下水圧変化, 地学雑誌, 122, 1, 159-169.
- 向井厚志・大塚成昭・福田洋一(2016): 地震に伴う湧水量および間隙水圧変化から推定された破碎帯の水理学的特徴, 測地学会誌, 62, 2, 63-78.
- Sato, T., R. Sakai, K. Furuya and T. Kodama(2000): Coseismic spring flow changes associated with the 1995 Kobe Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 8, 1219-1222.
- Wang, C., Y. Chia, P. Wang and D. Dreger(2009): Role of S waves and Love waves in coseismic permeability enhancement, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L09404, doi:10.1029/2009GL037330.